

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

裂隙岩層離散與連續體參數升尺度技術研究

Assessments of up-scaling techniques on estimating representative
permeabilities for fractured rocks

計畫編號：1022001INER004

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：倪春發

聯絡電話：03-4227151

E-mail address：nichuenf@gmail.com

核研所聯絡人員：莊怡芳

報告日期：102 年 11 月 29 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、研究方法與過程	6
一、尺度與含水層參數關係	6
二、離散裂隙與連體模式間等效參數分析概念	7
三、離散裂隙網路網格生成模式	10
(一) 裂隙強度(fracture intensity).....	10
(二) 裂隙方位與傾角量測.....	12
(三) 決定岩體裂隙個數.....	12
(四) 裂隙網路網格生成.....	13
四、離散裂隙網路網格生成模式	18
(一) 設定離散裂隙網路與連體模式邊界條件	18
參、主要發現與結論	21
肆、參考文獻	22

中文摘要

岩層中的孔隙與裂隙是岩層中水體流動與污染傳輸計算的最小單元，當分析區域擴大時，以孔隙或裂隙尺度為基礎去分析水流與污染傳輸，將成為不可能的任務。其中，除了大量的計算資源需求外，技術及經濟上都存在很大的困難性。為求技術上可行，以連續體的概念去分析大區域裂隙水流與污染傳輸問題，成為目前重要的分析方法。然而，岩層中的裂隙單元或裂隙群，若以連續體（或等效參數）的概念分析，其間的升尺度特性及等效參數的取得是相關分析的重要技術。本研究主要目的是透過數值模式分析及裂隙統計方式，建立及測試離散裂隙與連續體升尺度參數分析技術。經由岩層離散裂隙與連續體水流與污染傳輸分析結果，建立裂隙統計參數與升尺度等效參數間的關係，量化升尺度參數對水流與污染傳輸分析之差異；同時，由現地裂隙量測與分析結果實際應用於模式分析，提升大尺度裂隙含水層水流與污染傳輸分析技術。

Abstract

The fractures and pores in rock matrix are the fundamental units for calculations of flow and contaminant transport in fractured formations. Due to technical and logical limitations it is difficult in reality to account for such small units for simulations of flow and transport in large-scale problems. The concept of continuum representation of fractured rocks can provide an alternative to resolve the limitations of highly computational costs on flow and transport simulations. For these types of approaches the techniques to obtain the representative parameters such as permeability for fractured rocks are critical for accurate predictions of flow and transport in large-scale fractured formations.

The objective of this study is to develop the numerical techniques that are capable to efficiently characterize the representative parameter for fractured rocks. More specifically, the two-dimensional discrete fracture network model and the associated continuum models will be employed to systematically analyze the flow behaviors in fracture formations. Based on the concept of mass balance in flow, the correlations between fracture statistics and the representative continuum parameters will be developed and quantified for a variety of fracture distribution scenarios. The results of this study is expected to provide general insight into the procedures and the associated techniques for analyzing flow and transport in complex large-scale fractured rock systems.

壹、計畫緣起與目的

裂隙含水層水流及污染傳輸問題長久以來一直受到廣泛的重視，尤其是近年來重要的議題如長隧道開挖、核廢料儲存場址選定與評估、二氧化碳地質封存、深層地熱替代能源等，均與裂隙含水層水流特性息息相關[e.g., Bear et al., 1993; Huang et al., 1999; Berkowitz, 2002; Doughty and Pruess, 2004; Unger et al., 2004; Faybishenko et al., 2005; Finsterle, 2005; Benson and Surlles, 2006; Chen et al., 2006; Hyndman et al., 2007]。為瞭解裂隙含水層水流特性，取得合適的含水層參數例如水力傳導係數(hydraulic conductivity, K)或儲蓄係數(storage coefficient, S)等，為場址評估分析時重要的步驟。天然的含水層均存在不同程度的水力參數異質性[e.g., Dagan, 1989; Gelhar, 1993; Dagan and Neuman, 1997; Rubin, 2003; Rubin and Hubbard, 2005; Hyndman et al., 2007]，其中又以裂隙含水層之異質性程度較高，其異質性程度在小範圍內往往高於沖積型態之含水層數個級次(order)以上，利用水力或追蹤劑試驗方法去取得裂隙含水層參數，對於水文地質學者來說，目前還是一個非常困難的工作[e.g., Berkowitz, 2002; Neuman, 2005; Faybishenko et al., 2005; Rubin and Hubbard, 2005; Uchida et al., 2009]。

裂隙含水層內的孔隙介質組成主要分為兩部份，分別為水流通性高的裂隙及通水性差的母岩；依據母岩性質及含水層歷史應力條件，裂隙網路、開口大小，方向，長度以及裂隙內填充介質，會因不同時間與地點有極大的差異[Bear et al., 1993; Berkowitz, 2002; Faybishenko et al., 2005; Karpyn et al., 2009]，若再考慮裂隙含水層應力條件及物化性質，取得含水層參數過程將更複雜。過去

三至四十年在裂隙含水層的相關研究非常多[e.g., Bear et al., 1993; National Research Council, 1996; Faybishenko et al., 2005; Pooley et al., 2009; Praamsma et al., 2009]。Berkowitz[2002]，de Marsily[2005]及 Neuman[2005]即針對水文地質領域中，裂隙含水層研究的發展及應用趨勢做了詳盡的回顧。Faybishenko 等人[2005]結合了十六位模擬及試驗研究領域的學者，共同針對裂隙含水層水流及污染傳輸模擬，實驗室及現場尺度試驗，污染物傳輸與化學偶合分析，以及熱及微生物反應等議題發表其重要成果。其中，以數值模擬的研究佔較大比例，實驗室與現地尺度之水流與污染傳輸試驗研究相對地非常少，文中亦提到主要原因是裂隙含水層水流及傳輸特性複雜，加上經費、現有試驗儀器及設備限制，取得時間與空間上足夠的參數資訊非常困難，因此，多數的研究仍趨向於開發更複雜的模式，以期能充分反映裂隙含水層水流特性[e.g., Vesselinov et al., 2001ab; Rutqvist et al., 2002; Carrera et al., 2005; Faybishenko et al., 2005; Finsterle, 2005; McDermott et al., 2009; Meakin and Tartakovsky, 2009]。

近幾年來由於新的參數推估方法(包含量測及參數推估模式)例如水力剖面掃描、地電阻探測、震波折射或透地雷達等方法，整合應用於水力參數推估，使得現地尺度的裂隙含水層試驗與參數推估有重大的突破[Karasaki et al., 2000; Zhu and Yeh, 2005, 2006; Finsterle, 2005; Rubin and Hubbard, 2005; Chen et al., 2006; Le Borgne et al., 2006; Martinez-Landa and Carrera, 2006; Vereecken, 2006; Bohling et al., 2007; Ni and Yeh, 2008; Illman et al., 2008; Ni et al., 2009; Schweisinger et al., 2009]。此外，新的井內量測儀器開發(如超音波與井內成像技術、井內流速儀等)與水力試驗技術提升

(如分層抽注水試驗或微水試驗等)[e.g., Miyakawa et al., 2000; Butler and Zhan, 2004; Le Borgne et al., 2006; Novakowski et al., 2006; Hamm et al., 2007; Hyndman et al., 2007; Chen, 2008]，可以在現有鑽孔條件下，獲得空間上更高的解析度。然而，無論試驗方法或推估模式，這些新的技術在應用上仍存在著不同程度的問題需要解決，其中最常被研究者討論的問題則是裂隙資訊量測後的擴大應用，尤其是針對大尺度模擬分析時，如何將所量測的資訊轉換成可用代表性參數，準確地反應裂隙系統所代表的水流與污染傳輸狀態。此外，代表參數對於分析的結果與原來裂隙系統鎖反應的水流與污染傳輸行為，有多大的差異？本研究將以離散裂隙及聯體模式作為分析工具，初步選定剖面二維水流模式作為分析目標，考慮流通量的守恆作為代表性參數推估原則。經由不同裂隙統計模式產生的裂隙將以數值方法進行模擬，同時再以相同尺度建立聯體模式，透過相同尺度，離散裂隙與聯體模式之間應俱備質量守恆的觀點，分析不同裂隙統計模式及尺度下，所獲得的相應代表性水力參數。

貳、研究方法與過程

一、尺度與含水層參數關係

裂隙含水層參數量測及分析方法的選擇有幾項考量，例如在使用的量測方法與研究目標之間，其量測方法所得的數據敏感度(或誤差)是否符合研究標地？解析度是否符合需求？現地試驗條件如何？時間、資金以及參數推估之計算資源如何？最後還要考慮到現地試驗者的經驗以及已經存在的可用資料多寡決定[Berkowitz, 2002; Neuman, 2005; Hubbard and Rubin, 2005; Hyndman et al., 2007; Chen et al., 2006]。現地試驗資料的蒐集過程通常有其先後順序，低解析度(或大尺度)的資料可用來定性描述區域概況，一般可作為分析區域水文條件輸入與輸出之關係。之後高解析度的量測與分析，才依據所需由大區域範圍內，針對特定小區域範圍，選用相同或不同量測與分析方法進行量測並推估高解析度之含水層參數。目前世界上有多種水文地質量測方法，依據其量測尺度與所能提供的解析度，可繪製如圖 1 之尺度與解析度的關係圖。依據本研究井場範圍與量測方法，所關心的尺度大小在 10 至 100 m 的級次(order)以下。

以既有鑽井來看，井內造影配合井內流速量測可作為最小尺度之資訊，尺度在 10-1m。微水試驗可依裂隙網路條件延伸至井附近數公尺內，所得到的代表性參數尺度在 1m。跨孔式抽水試驗與跨孔式分層抽水試驗又大於微水試驗之量測尺度，所得到的代表性參數尺度在 10m。長期的水文資料量測如降雨、地下水位，河川水位等區域天然刺激源，尺度較大，所得到的代表性參數尺度在 10 至 100 m 間。本研究中重要的步驟之一，

量化各裂隙統計特性之代表性尺度參數，目前先以水力傳導係數作為主要分析標的。同時建立各尺度之相關性，以作為未來大尺度聯體模式建立時之重要參考依據。

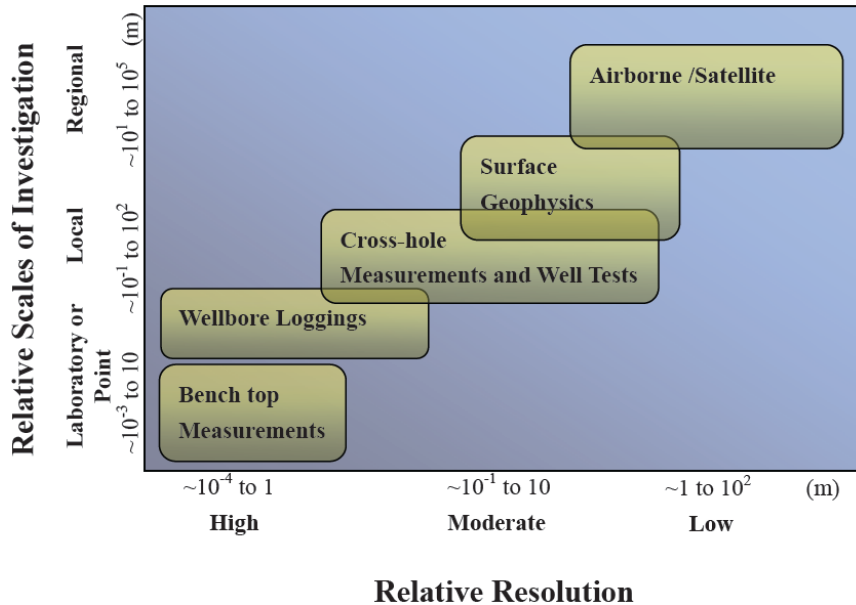


圖 1、量測尺度與解析度關係圖(修正自 Hubbard and Rubin, 2005)

二、離散裂隙與連體模式間等效參數分析概念

含水層參數如水力傳導係數(K)之升尺度問題(upscaling problem)已有非常多的相關文獻討論[e.g., de Marsily, 1986, Sanchez-Vila et al., 1996, 2006; Noetinger et al., 2005; Le Borgne et al., 2006; Zhang et al., 2005, 2006; Fleckenstein and Fogg, 2008; Nield, 2008; Blum et al., 2009]，最常使用的概念不外乎等效水力傳導係數(effective hydraulic conductivity, K_{eff})[e.g., Dagan, 1989; Gelhar, 1993; Sanchez-Vila et al., 1996; Zhang, 2002; Rubin, 2003; Zhang et al., 2005, 2006; Zhang, 2009]，圖 2 為水力傳導係數升尺度概念。小尺度的量測資料對於其上一尺度(亦即較大的尺度)

來說，可提供其點的資訊，由多處點的資訊結合後，可以建構大尺度水力傳導係數在空間中的分布[Rubin, 2003; Zhang et al., 2005, 2006; Zhang, 2009]。


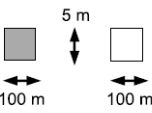
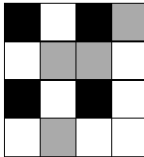
Scale	Conductivity	Simulation
Pixel scale (~100 sand grains)		not defined
Local scale (scaled-up pixel; local REV)		K (each K represents a local-scale, homogenous and isotropic porous medium)
Global scale (a stratigraphic unit comprising of many local REV)		$\mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} \\ K_{zx} & K_{zz} \end{bmatrix}$ (global \mathbf{K}^* is an equivalent conductivity for a stratigraphic unit; global \mathbf{K}^* arises due to heterogeneity of local K)

圖 2、水力傳導係數升尺度概念(資料來源：Zhang et al., 2006)

在裂隙含水層水流問題中，升尺度的概念可由達西定律(Darcy's Law)出發，描述含水層中水流特性的達西方程式可表示為[Sanchez-Vila et al., 1996; Zhang et al., 2005, 2006]：

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}, t) = -\mathbf{K}(\mathbf{x})\nabla h(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{q}(\mathbf{x})$ 為達西流率(Darcy flux)， $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ 為水力傳導係數， $\nabla h(\mathbf{x}, t)$ 則為總水頭。 $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ 為一向量， \mathbf{x} 與 t 分別表示為空間與時間座標。然而，在小尺度條件例如局部尺度(local scale)，點的量測資料可視為一純量。對於較大尺度的問題如相應此度的連體模式，若使用方程式描述水流特性，其水流控制方程式則變為[Dagan, 1989; Gelhar, 1993]：

$$q_g = -K_{\text{eff}}(\nabla h)_g \quad (2)$$

其中，下標 g 代表連體模式參數， K_{eff} 為等效水力傳導係數； q_g 及 $(\nabla h)_g$ 分別為連體模式之達西流率及水力梯度。由過去的研究顯示， K_{eff} 的值界於空間上算術平均水力傳導係數 K_A 與調和平均水力傳導係數 K_H 間，表示為[Sanchez-Vila et al., 1996]：

$$K_H \leq K_{\text{eff}} \leq K_A \quad (3)$$

Dagan (1989)、Gelhar(1993) 及 Zhang(2002) 更將 K_{eff} 與幾和平均水力傳導係數 K_G 建立，使得 K_{eff} 可由 K_G 結合地質統計參數獲得。若將裂隙含水層中的水力傳導係數及視為空間的隨機變數，亦即，假設 $\ln K = F + f'$ ，此處 F 為 $\ln K$ 的均值(mean)，而 f' 則代表微擾動量(perturbation)。同樣地，含水層中的水頭可表示為 $h = H + h'$ ，其中 H 為均值，而則 h' 為擾動量。則 K_G 與 K_{eff} 的關係的關係可表示為[Gelhar, 1993]：

$$K_{\text{eff}} = K_G \left[(1 + 0.5\sigma_f^2) \nabla H - E[f' \nabla h'] + \dots \right] \quad (4)$$

方程式(4)提供了等效水力傳導係數的一種近似算法，其中待定係數 σ_f^2 還須由裂隙統計參數獲得。

本研究將以數值模式作為分析工具，透過設定統計條件下的離散列分佈，可獲得一對應之連體模式等效滲透率參數。以下將詳述本研究建立離散裂隙網路模式與計算連體模式等效滲透率參數。

三、離散裂隙網路網格生成模式

本研究假定裂隙於岩體中生成時是一橢圓平面，並且經由實驗人員於野外量測裂隙強度，估算岩體內裂隙個數；因為岩體受力而使得裂隙圓盤產生破裂面會依據符合統計結構的方位與傾角。經由以上假設，本研究開發離散裂隙網路網格生成模式，透過 TOUGH2 計算離散裂隙網路與連體模式滲透率關係。

(一) 裂隙強度(fracture intensity)

關於裂隙強度量測有三種方式，分別為一維、二維與三維三種，以下將對各種方式進行解說。

1. 一維裂隙強度

此方法是於岩體上先建立一條測線(sampling scanline，如圖 3)，並且量測裂隙通過此測線個數，其計算公式：

$$*P_{10}(\text{number of fractures / length of scanline}) [L^{-1}]$$

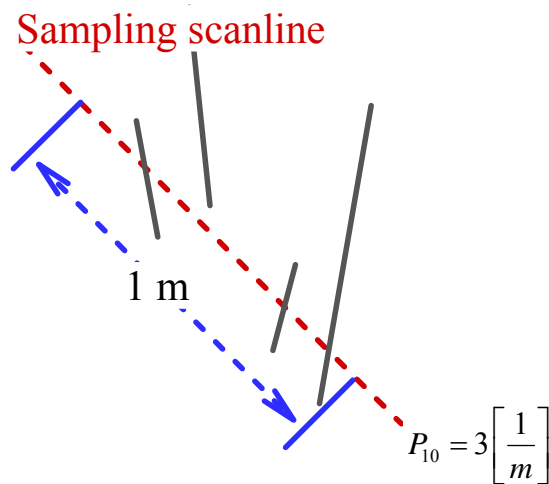


圖 3、一維量測裂隙強度示意圖

2. 二維裂隙強度

此方法是於岩體上先畫定量測範圍(如圖 4)，量測在此範圍內裂隙長度，其計算公式：

$$*P_{21}(\text{length of fracture traces / are of exposure}) [L^{-1}]$$

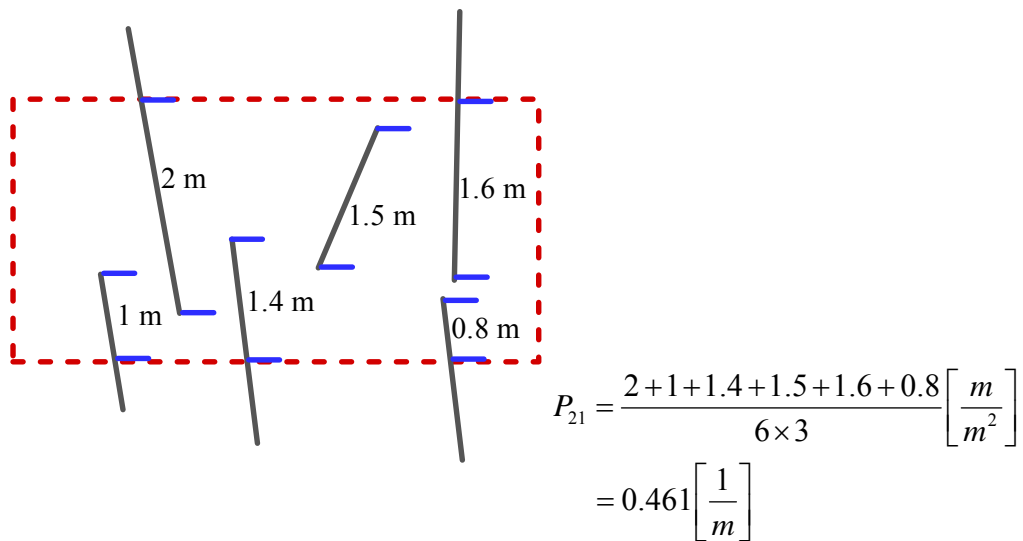


圖 4、二維量測裂隙強度示意圖

3. 三維裂隙強度

此方法與二維量測方式相似，在此則是先設定量測岩體體積，並且加總每個裂隙面的面積(如圖 5)，其計算公式：

$$*P_{32}(\text{area of fracture / volume of rock mass}) [L^{-1}]$$

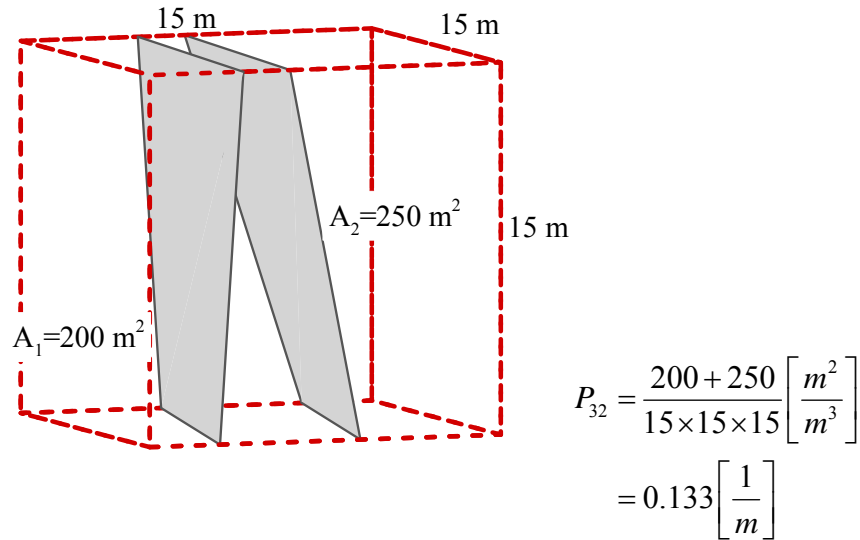


圖 5、三維量測裂隙強度示意圖

本研究所採用的量測方式是二維裂隙強度，故在野外量測岩石露頭時，需要先將岩體劃分數個視窗，並且分別量測視窗內每條裂隙長度，以利於計算岩體裂隙強度。

(二) 裂隙方位與傾角量測

經由上述方法已經可以建立裂隙於岩體中合理個數，但是裂隙生成是因為岩體受力產生破裂，因此各裂隙在破裂方位與傾角是必須符合統計結構，因此在野外量測裂隙方位與傾角則是更為重要。

(三) 決定岩體裂隙個數

本研究假定裂隙分布符合 homogeneous Poisson model，此統計結構：

$$P(N_i = n) = e^{-u_i} \frac{u_i^n}{n!} \quad u_i = \lambda \cdot v(A_i)$$

P 代表 Poisson 機率

N_i 代表第 i 個區域的裂隙數目

λ_i 代表第 i 個區域的 Poisson 分佈平均值

產生亂數必須要符合 $\sum_{j=1}^k \log(U_j) < -u$

(四) 裂隙網格網路網格生成

1. 產生符合統計結構的裂隙中心

依據野外量測裂隙強度，計算符合 Poisson 分布統計結構的裂隙中心個數(如圖 6)。

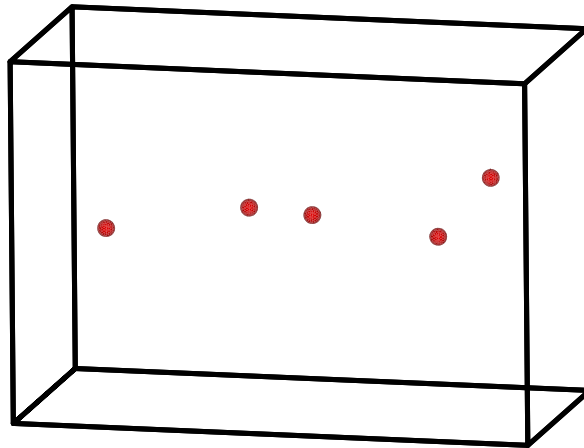


圖 6、裂隙中心於岩體分布情形

2. 產生各裂隙圓盤長短軸、方位角與傾角

在此則需要透過裂隙強度量測出露裂隙長度，並於裂隙平面所量測的方位角與傾角，如此產生各裂隙符合統計結構之長短軸、方位角與傾角。

(1) 建立 XY 平面橢圓節點

由於橢圓方程式是符合於二維平面，因此在建立三維橢圓平面之前，需要先依據長短軸先建立中心點為原點的橢圓，如圖 7。

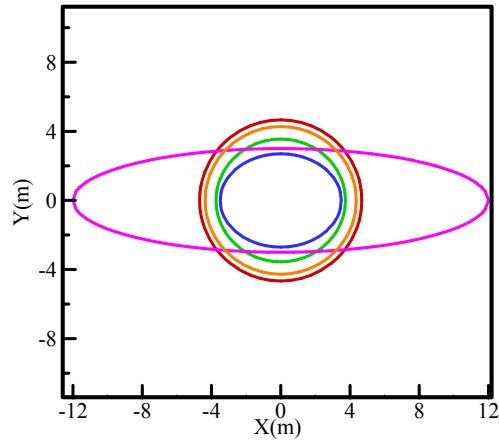


圖 7、裂隙橢圓於 XY 平面分布情形

(2) 旋轉橢圓圓盤

透過三角函數轉換公式，設定方位角為 θ_1 ，而傾角為 θ_2 ，本研究設定傾角圍繞 y 軸的旋轉角，而方位角則是繞 z 軸的旋轉角，將圖 7 中每個原先只有 XY 座標的節點，轉換為三維 XYZ 的空間座標，之後再分別於每個橢圓節點加上各自裂隙中心座標，如圖 8。

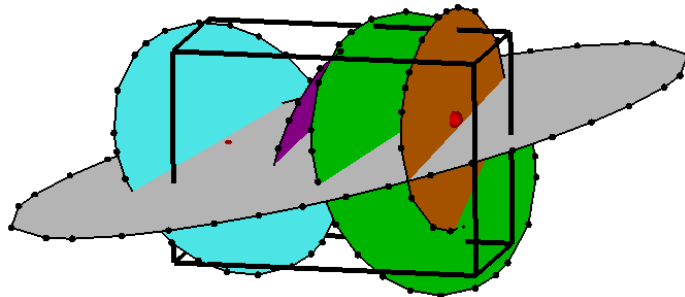


圖 8、裂隙橢圓節點三維空間分佈

(3) 搜尋岩體內裂隙圓盤範圍

透過旋轉後的橢圓節點，計算每個裂隙圓盤在岩體內的範圍，如圖 9 中，黃色虛線則是每個裂隙圓盤與岩體交

線邊界交線。

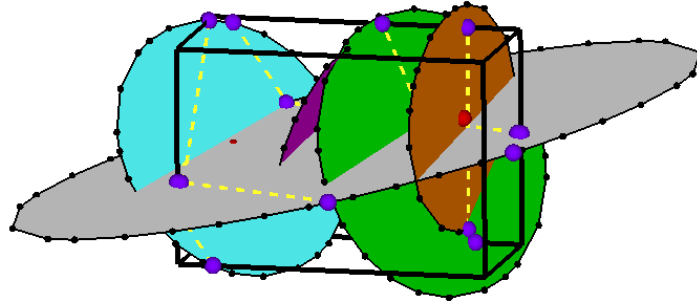


圖 9、裂隙圓盤與岩體邊界交線

(4) 搜尋兩兩橢圓間交線

接下來則是計算兩兩橢圓平面間之交線，如圖 10 中，白色實線則是每兩兩裂隙圓盤間交線。

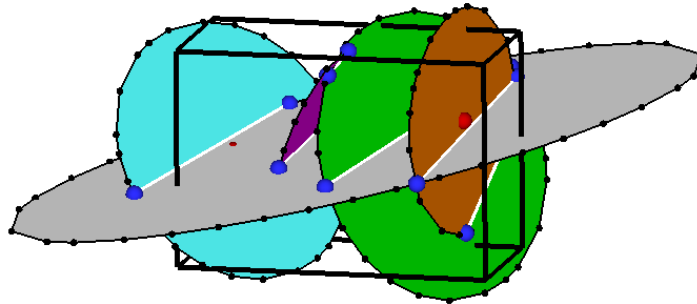


圖 10、兩兩裂隙圓盤間交線

(5) 設定裂隙橢圓邊界

由於已經得到每個橢圓與岩體邊界交線，如此則可以設定每個裂隙橢圓網格生成邊界，並且於岩體邊界交線上創立新的節點，邊界設定後再透過 Delaunay 三角化方法建立每個圓盤初始網格，如圖 11 所示。

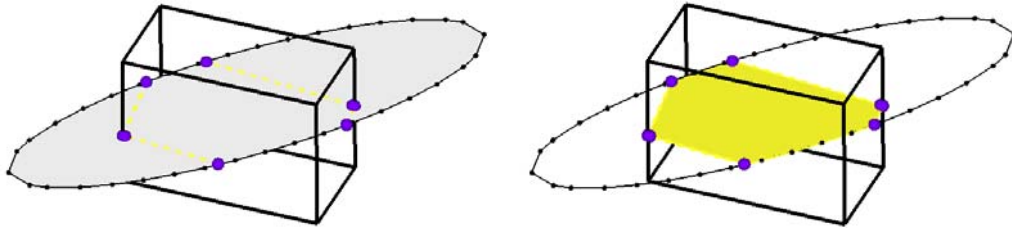


圖 11、裂隙橢圓圓盤邊界初始網格生成

(6) 裂隙圓盤內部網格生成

在此，本研究在生成初始網格後，先計算兩兩橢圓交線上的節點，進行交線上節點網格生成。決定每個橢圓邊界與交線的網格後，再生成其餘橢圓平面節點與網格，如圖 12 所示。

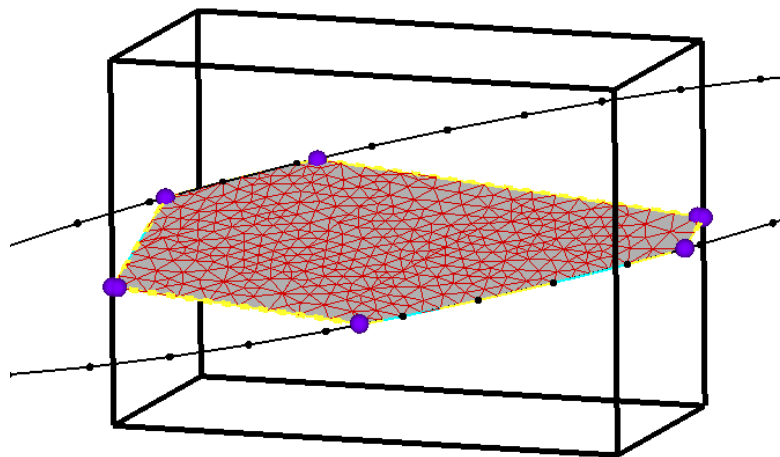


圖 12、裂隙橢圓圓盤內部網格生成

(7) 連接兩兩橢圓節點與網格

本研究是透過兩兩橢圓間交線進行串接，故首要任務在於確認每個橢圓在交線位置的節點是依序相連的，否則會出現如圖 13 情事發生，如此則須先進行交線回復，如圖 14。

交線回復後，則可以經由相同節點進行連接；因此本

研究將所有節點連接順序如下：

- a.先記錄所有橢圓邊界節點
- b.再記錄所有橢圓交線節點，相同節點只記錄一次
- c.最後再記錄所有橢圓未記錄節點

透過上述過程，則可以將所有節點與網格關係重現，如此即生成離散裂隙網路網格，如圖 15。

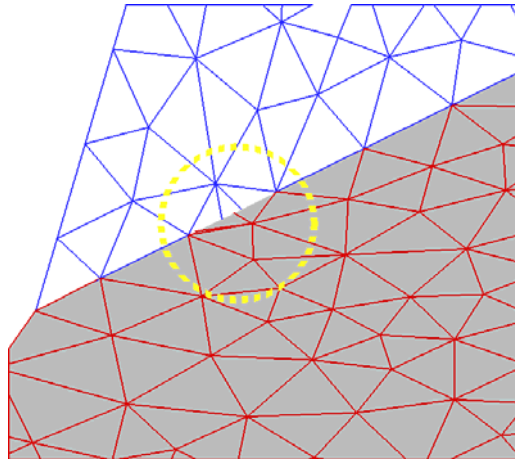


圖 13、裂隙橢圓交線節點無重合

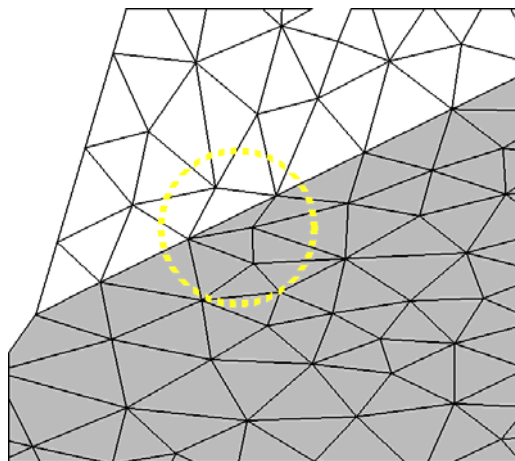


圖 14、橢圓交線回復

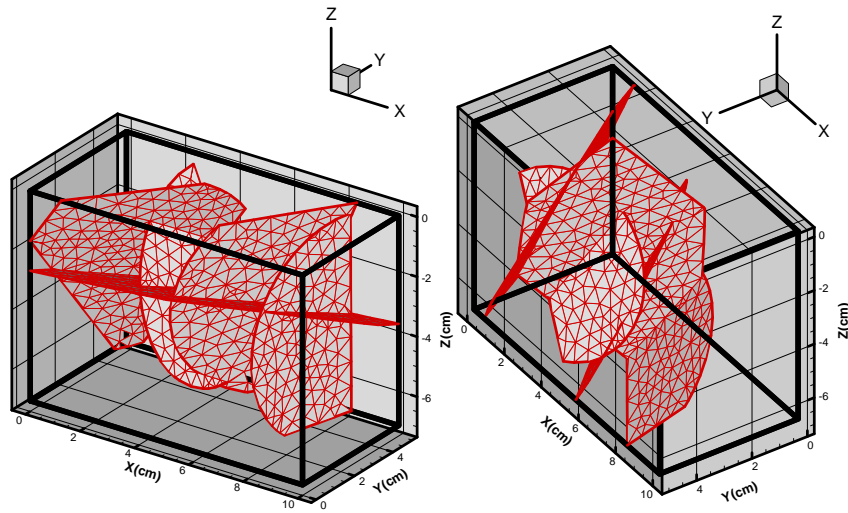


圖 15、離散裂隙網路網格生成

四、離散裂隙網路網格生成模式

本研究假定裂隙於岩體中生成時是一橢圓平面，並且經由實驗人員於野外量測裂隙強度，估算岩體內裂隙個數；因為岩體受力而使得裂隙圓盤產生破裂面會依據符合統計結構的方位與傾角。經由以上假設，本研究開發離散裂隙網路網格生成模式，透過 TOUGH2 計算離散裂隙網路與連體模式滲透率關係。

(一) 設定離散裂隙網路與連體模式邊界條件

本研究設定離散裂隙網路模式與連體模式是相同幾何形狀，由於現實狀況中，我們由於無法清楚了解岩體內裂隙的分布情形，故透過設計邊界條件，取得流通岩體的流量，進而計算連體模式的滲透係數。

1. 邊界條件

本研究需先設定模擬岩體大小，在此假定為一個長方體（長 10m、寬 5m 與高 7m），如圖 16。我們將設定於此岩體

兩側固定總水頭，岩體其餘四個面的邊界設定則為不透水邊界型態。圖 16 中紅色代表高水壓，反之藍色則代表低水壓，由此則可以建立一岩體均勻流場。相同地，離散裂隙網路模式則是在這兩個面上的網格設定其相同壓力分佈，如圖 17。

2. 計算離散裂隙網路模式流量

本研究於上個步驟中已決定邊界的網格，因此可以計算與邊界網格相連通的網格的壓力差，並透過達西定率計算其流量，此流量則可作為連體模式通過此岩體的流量。

3. 計算連體模式的滲透係數

本研究設定離散裂隙網路的滲透係數為 $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2$ ，透過兩個模式的相同流通量，因此可以計算連體模式的滲透係數為 $3.4 \times 10^{-11} \text{m}^3$ 。

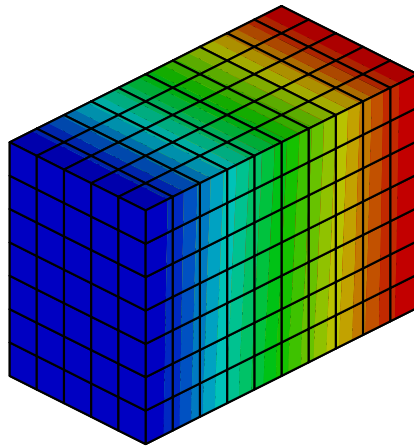


圖 16、測試例連體模式岩體幾何形狀與初始壓力設定

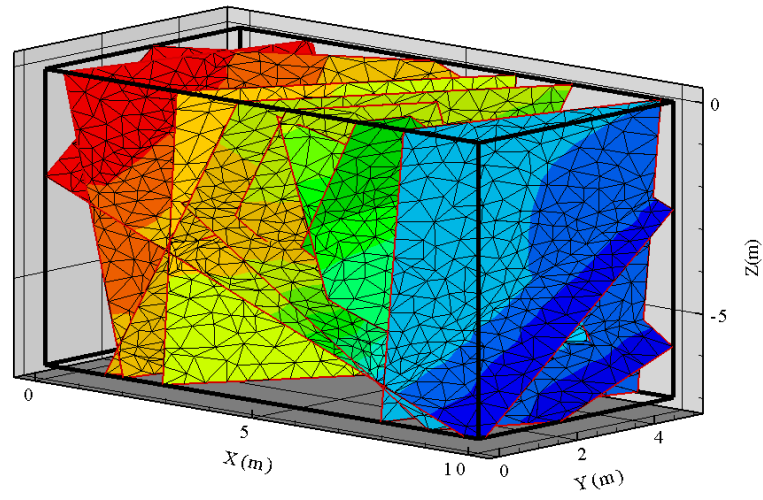


圖 17、測試例離散裂隙網路模式岩體幾何形狀與初始壓力設定

參、主要發現與結論

本研究完成裂隙統計模式與離散裂隙生成模式之回顧、評析與比較，以及完成離散裂隙模式中裂隙統計參數敏感度分析，離散裂隙網路模式建構、網格生成及流動與污染傳輸模擬。

建立連續體及裂隙等效參數推估技術之研究中，發現當裂隙水力傳導係數確定後，模擬範圍內水流流通量以邊界上裂隙個數主導總水流流量，連體水力傳導係數將小於裂隙水力傳導係數一至三個級數。隨著模擬或選定範圍的加大，水力傳導係數差異量將隨之加大，此結果和過去相關研究成果吻合。

肆、參考文獻

1. Bear, J., Tsang, C.-F. and Marsily, G.d., 1993. Flow and contaminant transport in fractured rock. Academic Press, San Diego.
2. Benson, S.M. and Surles, T., 2006. Carbon dioxide capture and storage: An overview with emphasis on capture and storage in deep geological formations. *Proceedings of the IEEE*, 94(10): 1795-1805.
3. Berkowitz, B., 2002. Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Advances in Water Resources*, 25(8-12): 861-884.
4. Blum, P., Mackay, R. and Riley, M.S., 2009. Stochastic simulations of regional scale advective transport in fractured rock masses using block upscaled hydro-mechanical rock property data. *Journal of Hydrology*, 369(3-4): 318-325.
5. Bohling, G.C., Butler, J.J., Zhan, X.Y. and Knoll, M.D., 2007. A field assessment of the value of steady shape hydraulic tomography for characterization of aquifer heterogeneities. *Water Resources Research*, 43(5): 23.
6. Butler, J.J. and Zhan, X.Y., 2004. Hydraulic tests in highly permeable aquifers. *Water Resources Research*, 40(12): 12.
7. Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hidalgo, J. and Slooten, L.J., 2005. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 13(1): 206-222.
8. Chen, C.S., 2008. An analytical method of analyzing the oscillatory pressure head measured at any depth in a well casing. *Hydrological Processes*, 22(8): 1119-1124.
9. Chen, J. et al., 2006. Development of a joint hydrogeophysical inversion approach and application to a contaminated fractured aquifer.

- Water Resources Research, 42(6).
10. Dagan, G., 1989. Flow and transport in porous formations. Springer-Verlag, New York.
 11. Dagan, G. and Neuman, S.P., 1997. Subsurface flow and transport: a stochastic approach. International hydrology series. Unesco : IAHS/AISH ; Cambridge University Press, New York.
 12. de Marsily, G.d., 1986. Quantitative hydrogeology: groundwater hydrology for engineers. Academic Press, Orlando, FL.
 13. de Marsily, G. et al., 2005. Dealing with spatial heterogeneity. Hydrogeology Journal, 13(1): 161-183.
 14. Doughty, C. and Pruess, K., 2004. Modeling supercritical carbon dioxide injection in heterogeneous porous media. Vadose zone Journal, 3(3): 837-847.
 15. Faybishenko, B., Witherspoon, P.A. and Gale, J., 2005. Dynamics of fluids and transport in fractured rock. Geophysical monograph. American Geophysical Union, Washington, DC.
 16. Finsterle, S., 2005. Multiphase inverse modeling: Review and iTOUGH2 applications. Vadose Zone Journal, 3(3): 747-762.
 17. Fleckenstein, J.H. and Fogg, G.E., 2008. Efficient upscaling of hydraulic conductivity in heterogeneous alluvial aquifers. Hydrogeology Journal, 16(7): 1239-1250.
 18. Gelhar, L.W., 1993. Stochastic subsurface hydrology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
 19. Hamm, S. et al., 2007. Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite. Engineering Geology, 92(1-2): 73-87.
 20. Huang, K., Tsang, Y. and Bodvarsson, G., 1999. Simultaneous inversion of air-injection tests in fractured unsaturated tuff at Yucca

- Mountain. *Water Resources Research*, 35(8): 2375-2386.
21. Hunt, A.G., 2006. Scale-dependent hydraulic conductivity in anisotropic media from dimensional cross-over. *Hydrogeology Journal*, 14(4): 499-507.
 22. Hyndman, D.W., Day-Lewis, F.D., Singha, K. and American Geophysical Union., 2007. *Subsurface hydrology : data integration for properties and processes*. American Geophysical Union, Washington, DC.
 23. Illman, W.A., Craig, A.J. and Liu, X., 2008. Practical issues in imaging hydraulic conductivity through hydraulic tomography. *Ground Water*, 46(1): 120-132.
 24. Karasaki, K. et al., 2000. A multidisciplinary fractured rock characterization study at Raymond field site, Raymond, CA. *Journal of Hydrology*, 236(1-2): 17-34.
 25. Karpyn, Z.T., Alajmi, A., Radaelli, F., Halleck, P.M. and Grader, A.S., 2009. X-ray CT and hydraulic evidence for a relationship between fracture conductivity and adjacent matrix porosity. *Engineering Geology*, 103(3-4): 139-145.
 26. Le Borgne, T., Bour, O., Paillet, F. and Caudal, J., 2006. Assessment of preferential flow path connectivity, and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer. *Journal of Hydrology*, 328(1-2): 347-359.
 27. Martinez-Landa, L. and Carrera, J., 2006. A methodology to interpret cross-hole tests in a granite block. *Journal of Hydrology*, 325(1-4): 222-240.
 28. McDermott, C.I., Walsh, R., Mettier, R., Kosakowski, G. and Kolditz, O., 2009. Hybrid analytical and finite element numerical modeling of mass and heat transport in fractured rocks with matrix

- diffusion. *Computational Geosciences*, 13(3): 349-361.
29. Meakin, P. and Tartakovsky, A.M., 2009. Modeling and simulation of pore-scale multiphase fluid flow and reactive transport in fractured and porous media. *Reviews of Geophysics*, 47: 47.
 30. Miyakawa, K., Tanaka, K., Hirata, Y. and Kanauchi, M., 2000. Detection of hydraulic pathways in fractured rock masses and estimation of conductivity by a newly developed TV equipped flowmeter. *Engineering Geology*, 56(1-2): 19-27.
 31. National Research Council (U.S.). Committee on fracture characterization and fluid flow., 1996. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Academy Press, Washington, D.C.
 32. Neuman, S.P., 2005. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks. *Hydrogeology Journal*, 13(1): 124-147.
 33. Ni, C. F. and Yeh, T., 2008. Stochastic inversion of pneumatic cross-hole tests and barometric pressure fluctuations in heterogeneous unsaturated formations. *Advances in Water Resources*, 31(12): 1708-1718.
 34. Ni, C. F., Yeh, T. and Chen, J., 2009. Cost-effective hydraulic tomography surveys for predicting flow and transport in heterogeneous aquifers. *Environmental Science & Technology*, 43(10): 3720-3727.
 35. Nield, D.A., 2008. Connectivity and effective hydraulic conductivity. *Transport in Porous Media*, 74(2): 129-132.
 36. Noetinger, B., Artus, V. and Zargar, G., 2005. The future of stochastic and upscaling methods in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 13(1): 184-201.

37. Novakowski, K., Bickerton, G., Lapcevic, P., Voralek, J. and Ross, N., 2006. Measurements of groundwater velocity in discrete rock fractures. *Journal of Contaminant Hydrology*, 82(1-2): 44-60.
38. Pooley, K.E. et al., 2009. Aerobic biodegradation of chlorinated Ethenes in a fractured bedrock aquifer: quantitative assessment by compound-specific isotope analysis (CSIA) and reactive transport modeling. *Environmental Science & Technology*, 43(19): 7458-7464.
39. Praamsma, T., Novakowski, K., Kyser, K. and Hall, K., 2009. Using stable isotopes and hydraulic head data to investigate groundwater recharge and discharge in a fractured rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 366(1-4): 35-45.
40. Raghavan, R., 2006. Some observations on the scale dependence of permeability by pumping tests. *Water Resources Research*, 42(7).
41. Rubin, Y., 2003. *Applied stochastic hydrogeology*. Oxford University Press, Oxford ; New York, xix, 391 p. pp.
42. Rubin, Y. and Hubbard, S.S., 2005. *Hydrogeophysics*. Water science and technology library. Springer, New York.
43. Rutqvist, J., Wu, Y., Tsang, C. and Bodvarsson, G., 2002. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4): 429-442.
44. Sanchez-Vila, X., Guadagnini, A. and Carrera, J., 2006. Representative hydraulic conductivities in saturated groundwater flow. *Reviews of Geophysics*, 44(3).
45. Sanchez-Vila, X., Carrera, J. and Girardi, J., 1996. Scale effects in transmissivity. *Journal of Hydrology*, 183(1-2): 1-22.
46. Schweisinger, T., Svenson, E.J. and Murdoch, L.C., 2009. *Introduction to Hydromechanical Well Tests in Fractured Rock*

- Aquifers. *Ground Water*, 47(1): 69-79.
47. Sun, N.-Z., 1994. Inverse problems in groundwater modeling. Theory and applications of transport in porous media, Kluwer Academic, Boston.
 48. Sykes, J.F., Wilson, J.L. and Andrews, R.W., 1985. Sensitivity analysis for steady-state groundwater-flow using adjoint operators. *Water Resources Research*, 21(3): 359-371.
 49. Uchida, M., Dershowitz, W., Lee, G. and Shuttle, D., 2009. An empirical probabilistic approach for constraining the uncertainty of long-term solute transport predictions in fractured rock using in situ tracer experiments. *Hydrogeology Journal*, 17(5): 1093-1110.
 50. Unger, A., Finsterle, S. and Bodvarsson, G., 2004. Transport of radon gas into a tunnel at Yucca Mountain - estimating large-scale fractured tuff hydraulic properties and implications for the operation of the ventilation system. *Journal of Contaminant Hydrology*, 70(3-4): 153-171.
 51. Vereecken, H., 2006. Applied hydrogeophysics. NATO science series. Series IV, Earth and environmental sciences. Springer.
 52. Vesselinov, V.V., Neuman, S.P. and Illman, W.A., 2001a. Three-dimensional numerical inversion of pneumatic cross-hole tests in unsaturated fractured tuff 1. Methodology and borehole effects. *Water Resources Research*, 37(12): 3001-3017.
 53. Vesselinov, V.V., Neuman, S.P. and Illman, W.A., 2001b. Three-dimensional numerical inversion of pneumatic cross-hole tests in unsaturated fractured tuff 2. Equivalent parameters, high-resolution stochastic imaging and scale effects. *Water Resources Research*, 37(12): 3019-3041.
 54. Zhang, D., 2002. Stochastic methods for flow in porous media:

- coping with uncertainties. Academic Press, San Diego.
55. Zhang, Y., 2009. Hierarchical Geostatistical analysis of an experimental stratigraphy. *Mathematical Geosciences*, 41(2): 145-162.
 56. Zhang, Y., Gable, C.W. and Person, M., 2006. Equivalent hydraulic conductivity of an experimental stratigraphy: Implications for basin-scale flow simulations. *Water Resources Research*, 42(5): 19.
 57. Zhang, Y., Person, M. and Gable, C.W., 2007. Representative hydraulic conductivity of hydrogeologic units: Insights from an experimental stratigraphy. *Journal of Hydrology*, 339(1-2): 65-78.
 58. Zhu, J.F. and Yeh, T.C.J., 2005. Characterization of aquifer heterogeneity using transient hydraulic tomography. *Water Resources Research*, 41(7).
 59. Zhu, J.F. and Yeh, T.C.J., 2006. Analysis of hydraulic tomography using temporal moments of drawdown recovery data. *Water Resources Research*, 42(2).